

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

**Analýza stabilizační svorky – srovnání
výsledků MKP s experimenty**

**Analysis of Stabilizer Clamp – FEM
Results vs. Test Results**

Student:

Bc. Radek Holub

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

OSTRAVA 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Holub**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika

Téma: **Analýza stabilizační svorky - srovnání výsledků MKP s experimenty**
Analysis of Stabilizer Clamp - FEM Results vs. Test Results

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod, popis zařízení.
2. Princip výpočtu zařízení dle normy FKM.
3. Modelování na bázi MKP.
4. Analýza výsledků a srovnání s měřením.
5. Identifikace materiálových dat.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Juliš K., Tepřík O., Slavík A. : Statika. SNTL / Alfa, Praha 1987.
- [2] Hoschl C. : Pružnost a pevnost ve strojnictví. SNTL / Alfa, Praha, 1971.
- [3] Kolář V., Němec I., Kanický V. : FEM Principy a praxe metody konečných prvků. Computer Press, 1997.
- [4] Kolář V., Kratochvíl J., Leitner F., Ženíšek A. : Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků. SNTL, Praha 1979.
- [5] Crisfield M. A. - Non-linear finite element analysis of solids and structures. John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, 1997.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V práci jsem použil interní údaje od firmy Mubea s.r.o. a firma s jejich zveřejněním nesouhlasí.

V Ostravě 15.05 2017

Radek Holub
.....

Bc. Radek Holub

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 15.05 2017

Radek Holub
.....

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Radek Holub

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Jičínská 271, Nový Jičín, 741 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HOLUB, R. *Analýza stabilizační svorky – srovnání výsledků MKP s experimenty, diplomová práce*. OSTRAVA: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2017, 42 s. Vedoucí práce: Podešva, J.

Diplomová práce se zabývá životností stabilizační svorky a vlastnostmi hyperelastických materiálů. V úvodu této práce byla představena společnost Mubea s.r.o. Byla vysvětlena funkce stabilizační tyče v automobilu. Poté byly popsány experimentální metody a materiálové modely pryže. Materiálové parametry pryže byly získány z výsledků dvou experimentů pryže. Dále byly popsány principy vyhodnocování životnosti součástí za pomoci příručky FKM. Počet cyklů do únavového lomu svorky stabilizátoru byl určen podle příručky FKM. Byl popsán experiment s cílem získat únavovou životnost svorky stabilizátoru a výsledky tohoto experimentu. Výsledky z celé práce byly porovnány a také byly vypsány doporučení, které plynou z výsledků této práce. Nakonec je v závěru zhodnocena celá práce.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

HOLUB, R. *Analysis of Stabilizer Clamp – FEM Results vs. Test Results, Master Thesis*. OSTRAVA: Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2017, 42 p. Thesis head: Podešva, J.

This thesis deals with the fatigue limit of the stabilizer clamp and hyperelastic materials properties. In the introduction of this thesis the company Mubea s.r.o. is introduced. Then the function of stabilizer bar in a car is explained. Further the experimental methods and material models of rubber are described. Material parameters of rubber are obtained from results of the two experiments. General principle according to the FKM guideline is described. Number of cycle until fatigue fracture of stabilizer clamp according to FKM guideline is solved. Experiment with aim to obtain fatigue limit of stabilizer clamp with results is introduced. The results from the whole thesis are compared and the recommendations written. In the end the whole thesis was evaluated.


PROHLÁŠENÍ VEDOUcíHO DIPLOMOVÉ PRÁCE O DUŠEVNÍM VLASTNICTVÍ VÝSLEDKU DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vzhledem k výlučnému duševnímu vlastnictví výsledků diplomové práce, opíraje se o článek 1 Zásad pro vypracování diplomové práce, dokumentu FS_SME_05_003, je komplexní vyřešení zadání práce zařazeno jako technická zpráva. Cituji z dokumentu FS_SME_05_003 „... Tato technická zpráva bude k dispozici pouze oponentům a členům komise pro obhajobu, kteří tímto budou vázáni mlčenlivostí o jejím obsahu.“

Z pozice vedoucího diplomové práce uznávám ve 100% rozsahu obsah technické zprávy jako úspěšné vyřešení diplomové práce.

Toto prohlášení se opírá o skutečnost, že výsledek diplomové práce je v současné době vlastnictvím firmy Mubea s.r.o. a uveřejněním celého textu práce v systému Edison by mohlo dojít ke zcizení duševního vlastnictví.

V Ostravě dne 15.5.2017



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, ZNAČEK A SYMBOLŮ	9
ÚVOD	12
CÍLE PRÁCE	14
1 MUBEA S.R.O.	15
2 POPIS STABILIZÁTORU	16
2.1 ÚČEL	16
2.2 ČINNOST	16
2.3 HLAVNÍ PŘÍNOSY STABILIZÁTORU NA VOZIDLE	16
2.4 ZATÍŽENÍ.....	17
2.5 TYPY.....	18
2.5.1 ZKRUTNÉ STABILIZÁTORY.....	18
2.5.2 ELEKTRONICKY ŘÍZENÉ STABILIZÁTORY	18
3 EXPERIMENTÁLNÍ METODY A MATEMATICKÉ MODEL Y PRYŽÍ	19
3.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	19
3.2 TAHOVÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	20
3.3 EXPERIMENTY PRO ZÍSKÁNÍ VSTUPNÍCH MATERIÁLOVÝCH DAT PRO MKP	23
3.3.1 JEDNOO SÁ TAHOVÁ ZKOUŠKA	23
3.3.2 PROSTÝ SMYK.....	24
3.3.3 TAHOVÁ ZKOUŠKA VE DVOU OSÁCH	24
3.3.4 VOLUMETRICKÝ TEST (OBJEMOVÁ KOMPRES E)	25
3.4 HYPERELASTICKÉ MATERIÁLOVÉ MODEL Y V SOFTWARE ANSYS WORKBENCH.....	26
3.4.1 NEO-HOOKEOVSKÝ MATERIÁLOVÝ MODEL	27
3.4.2 MOONEY-RIVLINGŮV MATERIÁLOVÝ MODEL	28
3.4.3 YEOHŮV MATERIÁLOVÝ MODEL	29
3.4.4 OGDENŮV MATERIÁLOVÝ MODEL	30

4	IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ PRYŽE.....	31
5	PRINCIP VÝPOČTU A VYHODNOCENÍ DLE PŘÍRUČKY FKM.....	32
5.1	ZÁKLADNÍ ODVĚTVÍ, KTERÝMI SE FKM ZABÝVÁ	32
5.2	FKM GUIDELINE V OBLASTI ŽIVOTNOSTI POSUZUJE NÁSLEDUJÍCÍ PARAMETRY	32
5.3	VÝPOČTY JSOU ZALOŽENY:	33
5.4	POUŽITÍ VÝSLEDKŮ Z MKP ANALÝZY	33
5.5	POTŘEBNÉ VSTUPNÍ HODNOTY	33
5.6	INTEGRACE DO SOFTWARE HYPERWORKS.....	34
5.7	STRUKTURA PROGRAMU.....	34
5.8	ZÁVĚR.....	34
6	VÝPOČET NA BÁZI MKP A VYHODNOCENÍ DLE FKM	35
7	VÝSLEDKY ŽIVOTNOSTI SVORKY ZÍSKÁNE EXPERIMENTEM.....	36
8	CELKOVÉ ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ.....	37
9	ZÁVĚR.....	38
	PODĚKOVÁNÍ.....	39
	ZDROJE.....	40
	PŘÍLOHY NA CD NOSIČI	42

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, ZNAČEK A SYMBOLŮ

SEZNAM ZKRATEK

<i>MKP</i>	Metoda konečných prvků
VDMA FKM	„Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau ForschungsKuratorium Maschinenbau“

SEZNAM ZNAČENÍ – LATINSKÁ ABECEDA

Značka	Jednotka	Význam
b_1	[–]	První exponent únavové pevnosti
b_2	[–]	Druhý exponent únavové pevnosti
C_{ij}	[MPa]	Materiálové konstanty
d	[MPa ⁻¹]	Parametr materiálové nestlačitelnosti
d_k	[MPa ⁻¹]	K-tý parametr materiálové nestlačitelnosti
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
f	[–]	Koeficient tření
f_w	[–]	Faktor únavové pevnosti
F	[N]	Velikost působící síly
F_{MAX}	[N]	Maximální působící síla
F_{NORMAL}	[N]	Konečná kontaktní síla
I_1	[–]	První deformační invariant
I_2	[–]	Druhý deformační invariant
I_3	[–]	Třetí deformační invariant
J	[–]	Poměr mezi deformovaným a původním objemem

Značka	Jednotka	Význam
K	[MPa]	Počáteční objemový modul
k_{NORMAL}	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}]$	Kontaktní tuhost
L	[mm]	Deformovaná délka vzorku
L_0	[mm]	Počáteční délka zkušebního tělesa
L_t	[mm]	Zvětšení upínací vzdálenosti mezi čelistmi
L_{up}	[mm]	Upínací vzdálenost mezi čelistmi
M	[–]	Počet
N	[–]	Počet cyklů
N_{C1}	[–]	Tranzitní počet cyklů
N_Z	[–]	Počet cyklů požadovaných zákazníkem
R	[–]	Součinitel asymetrie cyklu
R_e	[MPa]	Mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
S_1	[MPa]	První materiálový parametr
S_2	[MPa]	Druhý materiálový parametr
S_0	$[\text{mm}^2]$	Původní průřez zkušebního tělesa
SRI_1	[MPa]	Rozkmit napětí
S_Z	[MPa]	Únavová pevnost
t	[s]	Čas
T	[s]	Perioda
W	[J]	Funkce hustoty deformační energie
x_{PENET}	[mm]	Velikost penetrace

SEZNAM ZNAČENÍ – ŘECKÁ ABECEDA

Značka	Jednotka	Význam
α_i	[–]	I-tý parametr zpevňování či změkčování materiálu
ΔL_0	[mm]	Zvětšení počáteční měřené délky
$\Delta\sigma$	[MPa]	Rozkmit napětí
ε	[%]	Poměrné prodloužení
ε_t	[%]	Jmenovité poměrné prodloužení
λ	[N]	Lagrangeův multiplikátor
λ_p	[–]	P-té protažení
μ	[MPa]	Počáteční smykový modul
μ_i	[MPa]	I-tý počáteční smykový modul
ν	[–]	Poissonovo číslo
$\sigma_{(t)}$	[MPa]	Průběh harmonického signálu
σ_C^*	[MPa]	Mez únavy hladkého vzorku
σ_f'	[MPa]	Únavová pevnost
σ_a	[MPa]	Amplituda napětí
σ_b	[MPa]	Napětí při přetržení
σ_d	[MPa]	Dolní napětí
σ_h	[MPa]	Horní napětí
σ_m	[MPa]	Střední napětí
σ_Y	[MPa]	Napětí na mezi kluzu
ω	[s ⁻¹]	Kruhová frekvence amplitudy napětí

ÚVOD

Tyč stabilizátoru je velmi důležitou součástí automobilového zavěšení kol. Hlavním úkolem tyče stabilizátoru je snižování náklonu vozidla při průjezdu zatáčkou a tím také možnost projet zatáčku vyšší rychlostí. Jedním z faktorů, které mají vliv na funkci a chování stabilizační tyče, je způsob, kterým je spojen s rámem automobilu. Toto spojení musí být schopno absorbovat poměrně velké deformace tyče stabilizátoru. Proto jsou pryžová pouzdra běžně využívána pro upínání stabilizátoru k rámu vozidla. Pro takové pouzdro je však nutné předvídat, jak se bude chovat za provozu vozidla.

K jedné z nejdůležitějších oblastí, kterou se zabývají strojní inženýři, patří problematika navrhování a dimenzování strojních součástí a jejich celků, a to s ohledem na jejich předpokládanou funkci, způsobu zatížení a délkou životnosti. Tyto úlohy v praxi řeší výpočtáři a konstruktéři, kteří při své práci využívají výsledky z mnoha vědeckých oborů. Jedním z těchto vědeckých oborů je také mechanika těles, která se zabývá kinematikou a dynamikou součástí za provozu. Také umožňuje provádět pevnostní výpočty a předvídat, zdali můžou nastat možné mezní stavy.

K meznímu stavu dochází tehdy, když daná součást ztrácí schopnost vykonávat svou primární funkci, pro kterou byla určena. Je to tedy takový stav, který je z hlediska funkce součásti nepřijatelný a vyřazuje ji z provozu. Existuje velké množství mezních stavů, ale mezi nejčastější mezní stavy v praxi patří mezní stav vzpěrné stability, mezní stav pružnosti a mezní stav únavy. Vznik prvních dvou uvedených mezních stavů je velmi dobře znám a v současné době při vysoké úrovni výpočetní techniky se dá jejich vznik předpovědět i ve velmi složitých případech. [1]

Mezní stav spojujeme také s termínem únava materiálu. Nauka o únavě materiálu se nazývá lomová mechanika. Mezi základní etapy únavy materiálu součásti patří iniciace trhliny, její následné šíření a na závěr náhlý dolom průřezu. I přes vysoký pokrok v oblasti únavového života neexistuje dosud žádný jednotný popis únavových mechanismů. Výpočtové modelování se tak omezuje na mnoho empirických modelů. [1]

Existuje mnoho důvodů, proč je nutné zabývat se problematikou únavové životnosti. V technické praxi se únava materiálu objevuje velmi často. Občas bývají její následky závažné. Z tohoto důvodu je nutné s dostatečnou přesností znát zbytkovou únavovou životnost součásti, aby bylo možné vyřadit ji ve správnou dobu z provozu. V opačném případě by mohlo dojít k selhání součásti. Ve vědecké oblasti je snaha únavové mechanismy jednoznačně fyzikálně popsat a sjednotit již vzniklé teorie. [1]

Poslední dobou se velmi často používají v automobilovém průmyslu plastové a pryžové materiály. Gumové materiály vykazují určitý druh chování, kterému se říká hyperelasticita. Několik materiálových modelů pro popsání tohoto chování je k dispozici v literaturách, které se zabývají těmito materiály. Tyto modely jsou založeny na popisu funkce potenciální deformační energie. Mezi nejpoužívanější modely patří Mooney-Rivlingův materiálový model a Ogdenův materiálový model. V obou případech je vhodné použít alespoň jednoosé a dvouosé tahové zkoušky pro získání materiálových parametrů. Výsledky těchto testů je pak vhodné použít pro kalibraci hyperelastických modelů. MKP simulace pak slouží pro srovnání výsledků s experimentálními daty.

Pryžové materiály jsou používány v široké škále v různých průmyslových oblastech, jako jsou těsnění, pneumatiky vozidel, hydraulických hadic, tlumičů vibrací a dalších. Tyto materiály obvykle vykazují velmi velké deformace se silně nelineárním chováním. Široký rozsah použití hyperelastických materiálů odůvodňuje také vysoký zájem o výzkum v oblasti jejich charakteristických vlastností. Za použití experimentální techniky je možné popsat jejich konkrétní chování. Mechanické zkoušky na gumových materiálech jsou dvojího druhu. Jedná se o kompresi a o tah, přičemž kompresní stav je vždy jednoosý. U tahového stavu může být jednoosý, víceosý nebo také rovinný.

CÍLE PRÁCE

V této kapitole budou stručně popsány cíle práce.

1. Stručný popis o firmě Mubea s.r.o.
2. Popis automobilového stabilizátoru, jeho účel, hlavní přínosy na vozidle, zatížení a základní typy.
3. Popis experimentálních metod pro pryžové materiály, které se provádějí za účelem získání hyperelastických materiálových parametrů.
4. Popis základních hyperelastických materiálových modelů, které se používají v prostředí softwaru ANSYS Workbench.
5. Provedení minimálně jednoho experimentu, za účelem získání materiálových parametrů pryže a jejich následné použití pro výpočet únavové životnosti.
6. Stručný přehled principu výpočtu životnosti dle směrnice FKM.
7. Samotný výpočet životnosti konkrétní svorky dle příručky FKM:
 - a) Tvorba geometrického modelu.
 - b) Tvorba konečnoprvkového modelu a výpočet statické analýzy v prostředí ANSYS Workbench.
 - c) Vyhodnocení na základně Wöhlerovy křivky a amplitudy napětí dle hypotézy HMM v softwaru ANSYS Workbench a v softwaru HyperView.
8. Popsat únavový zátěžový cyklický test systémových komponent podvozkové části automobilu.
9. Provést srovnání výsledků životnosti svorky získané pomocí konečnoprvkové analýzy a pomocí experimentu.
10. Zjistit, zdali má změna materiálových parametrů pryže vliv na amplitudu napětí na svorce stabilizátoru

1 MUBEA s.r.o.

Historie firmy začíná v roce 1916, tehdy se firma zabývala pružinami. Dnes je již tato firma globálním partnerem pro automobilový průmysl a specialistou na odlehčené konstrukce, zaměřené na vysoce namáhané pružinové komponenty a podobné výrobky. Mezi zákazníky patří téměř všichni výrobci automobilů po celém světě.

Společnost je organizovaná do následujících obchodních jednotek:

- Díly motorů
- Podvozkové díly
- Součásti pohonu
- Součásti karoserie
- Interiér
- Talířové pružiny
- Poprodejní služby
- Kompozitové výrobky



Obrázek 1 Nápravová pružina a systém napínání řemenu

Zdroj: <https://www.mubea.com/cz/products-technologies/>

Filosofie firmy MUBEA s.r.o.

„DRIVEN BY THE BEST“ je slogan, který odpovídá požadavkům zákazníka, které jsou kladeny na Mubeu a také hodnotám firmy. Aby firma dosáhla toho nejlepšího, je poháněna nejen vysokými nároky zákazníků, ale také nejlepšími zaměstnanci.

S iniciativou „DRIVEN BY THE BEST“ by firma ráda docílila jednotného základu pro celosvětovou spolupráci, kde se propojí komunikace mezi všemi závody i různými kulturami.

Ve všech závodech vznikly lokální projektové týmy, ve kterých jsou zaměstnanci z různých oblastí, kteří nároky „DRIVEN BY THE BEST“ spolu projednávají, diskutují o nich, podporují a prosazují konkrétní opatření.

2 Popis stabilizátoru

2.1 Účel

Základním předpokladem pro bezpečnou jízdu je stabilita vozidla. Při průjezdu zatáčkou ve vyšší rychlosti se snižuje přilnavost kol, které se pohybují uvnitř zatáčky. Tímto klesá jejich schopnost přenášet boční síly. V důsledku tak dochází k nežádoucímu vynášení vozidla ze zatáčky. K tomu slouží odpružení vozidla, které zajišťuje stálou přilnavost všech kol k vozovce. Kromě tlumičů pérování zajišťují tuto funkci stabilizátory.

2.2 Činnost

Jestliže obě kola téže nápravy najedou na stejně vysokou nerovnost, zkrutná tyč se pouze pootočí v pryžových pouzdrech, aniž by se zkrucovala.

Pokud jedno kolo najíždí na překážku, zkrutná tyč se bude pohybovat směrem k vozidlu a rameno stabilizátoru se natočí nahoru. Zkrutná tyč pak tento pohyb přenesení i na druhé rameno. Druhé rameno se bude pohybovat ve stejném smyslu a bude stlačovat příslušnou pružinu a tím se sníží naklopení vozidla.

Při průjezdu zatáčkou se vnější pružiny budou stlačovat více než pružiny vnitřní. Na vnitřní pružině vozidla se rameno bude zkrucovat směrem nahoru a jeho tuhost bude působit proti pružině (bude ji stlačovat). Opačné rameno stabilizátoru (na vnější straně zatáčky) se také bude zkrucovat nahoru a bude působit proti stlačující pružině, a tím se sníží naklopení karoserie.

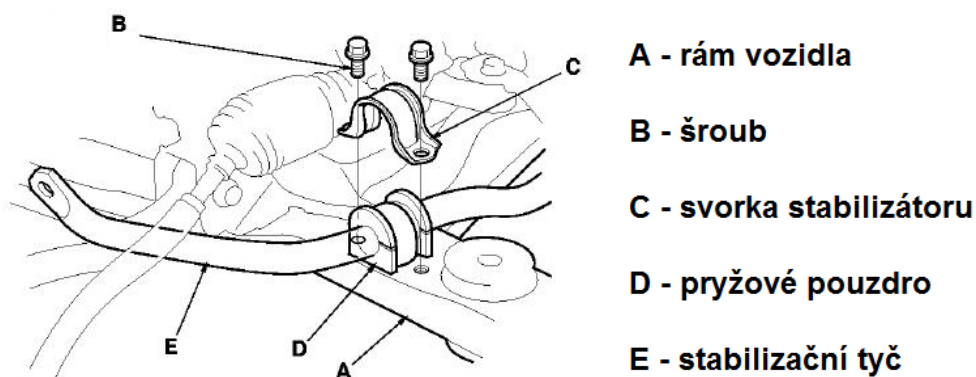
Velikost stabilizace je závislá na tuhosti stabilizátoru. Platí, že čím je stabilizátor tužší, tím je menší naklopení karoserie. Nutno však dodat, že příliš vysoká tuhost stabilizátoru může vést k nadměrnému odlehčování vnitřního kola a tím ke snížení směrové stability vozu.

2.3 Hlavní přínosy stabilizátoru na vozidle

- Redukuje stranové naklání vozidla při průjezdu zatáčkou a naklání při jiných rychlých změnách směru bez omezení komfortu,
- Snižuje rozdíl zatížení mezi vnitřním a vnějším kolem při průjezdu zatáčkou,
- Snižuje tendence k přetáčivosti popřípadě nedotáčivosti vozidla.

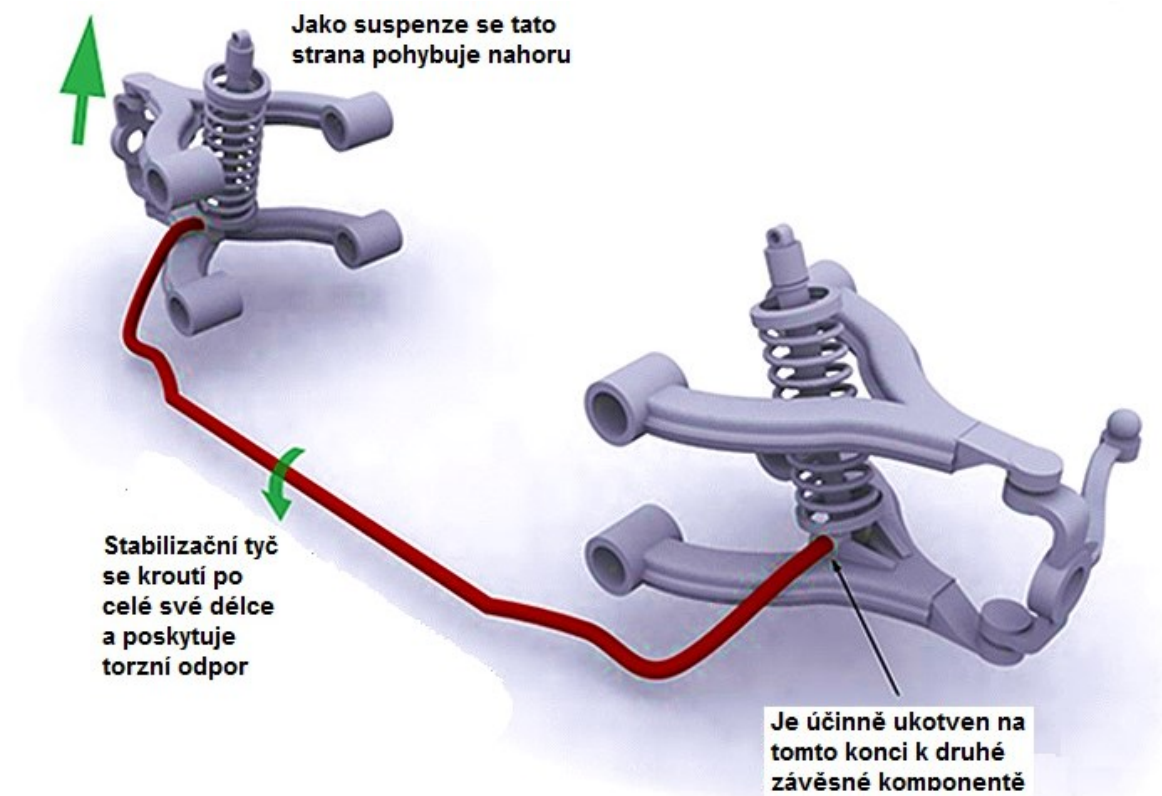
2.4 Zatížení

Samotná stabilizační tyč je namáhána pouze krutem. Stabilizační tyč je dále spojena k rámu vozidla. Toto propojení musí být schopno absorbovat poměrně velké deformace. Proto se běžně pro uchycení stabilizátoru k rámu používají pryžová pouzdra. Pro správné navrhnutí pryžového pouzdra stabilizátoru musíme přesně předvídat, jak se bude pouzdro chovat. Na obrázku 2 je zobrazeno uchycení stabilizátoru k rámu vozidla.



Obrázek 2 Schéma upevnění stabilizátoru k rámu

Zdroj: <http://www.driveaccord.net/forums/attachment.php?attachmentid=5150>



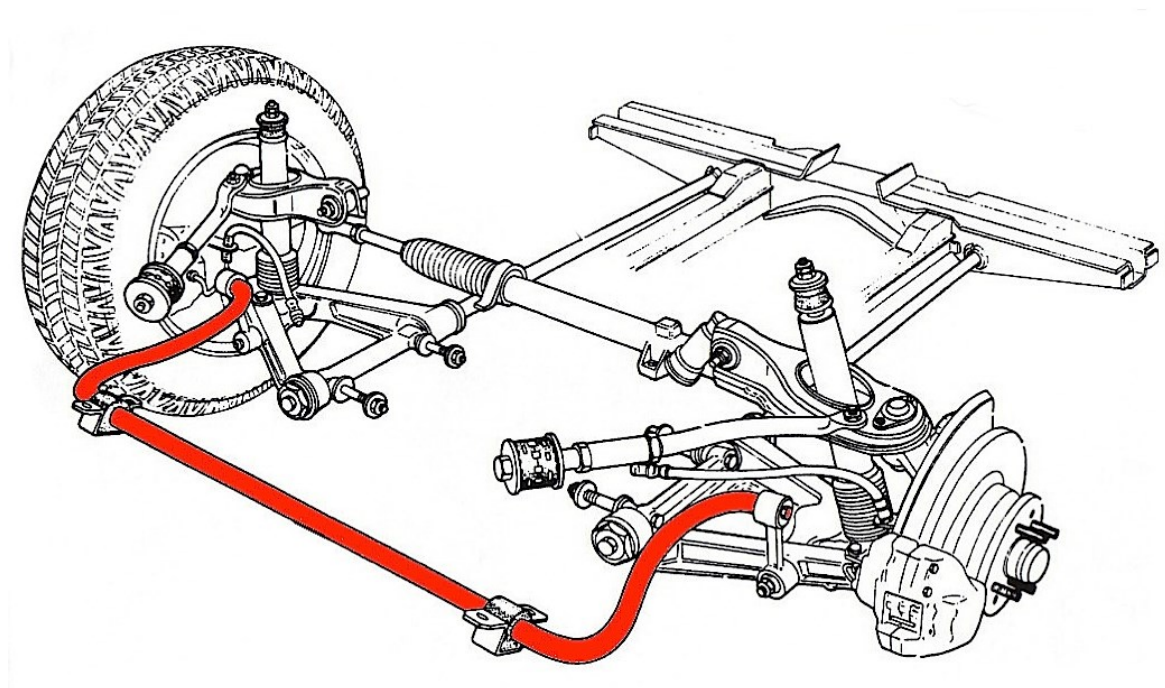
Obrázek 3 Schéma popisující chování stabilizátoru

Zdroj: <http://speed.academy/wp-content/uploads/2014/11/swaybar-tech-07.jpg>

2.5 Typy

2.5.1 Zkrutné stabilizátory

Stabilizátor zmenšuje naklopení karoserie při průjezdu zatáčkou. Standardně je na každé nápravě jeden stabilizátor, který je umístěný mezi koly napříč. Standardně jsou stabilizátory vyráběny ve tvaru písmene U. Tento typ stabilizátoru je pojmenován jako zkrutný stabilizátor. Většinou je stabilizátor připevněn k rámu vozidla, popřípadě ke karoserii pomocí kovopryžového pouzdra (silentbloku). Každý konec stabilizátoru je propojen s nábojem kola jedné nápravy a to tak, aby bylo možné přenášet výchylky každého kola. Zkroucením stabilizátoru je vyvolávána síla, která zvyšuje přilnavost kola s vozovkou. Míra stabilizace je závislá na průměru (popř. tuhosti) zkrutné tyče.



Obrázek 4 Stabilizátor tvaru „U“

Zdroj: <http://speed.academy/wp-content/uploads/2014/11/swaybar-tech-06.jpg>

2.5.2 Elektronicky řízené stabilizátory

Spojují principy olejového a zkrutného stabilizátoru. Zkrutná tyč je spojena s rameny či tlumiči nápravy, a to pomocí olejových válců s písty. Při propružení je přes elektronicky ovládané škrtkové ventily tlačěn olej. Řízením škrtkových ventilů je redukována síla působící na zkrutný stabilizátor. Tím způsobem je možné řídit stabilizační účinek.

3 EXPERIMENTÁLNÍ METODY A MATEMATICKÉ MODELY PRYŽÍ

3.1 Základní rozdělení polymerů

Základními skupinami polymerních materiálů jsou plasty a elastomery. Pokud se však hovoří o plastech, tak jsou na mysli termoplasty a reaktoplasty. Když ale hovoříme o polymerech, máme na mysli jak termoplasty, tak reaktoplasty a také elastomery.

Rozdělení polymerů je tedy následující

- Plasty
 - Termoplasty
 - Reaktoplasty
- Elastomery
 - Kaučuky
 - Termoplastické elastomery

V tomto textu se již budeme věnovat pouze elastomerům. Mezi elastomery patří velice pružné materiály s nízkou tuhostí. Ty se pak mohou za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Jedná se tedy o deformaci převážně vratnou. Mezi typické představitele patří kaučuky, ze kterých se vulkanizací vyrábějí pryže (velmi pružný materiál, odolný proti trvalé deformaci). Pryž je vulkanizovaný elastomer a je charakterizována příčnými vazbami mezi makromolekulami, které vytváří uzly prostorové sítě.



Obrázek 5 Příklady aplikací pryží (a) a termoplastických elastomerů (b)

Zdroj: <https://publi.cz/books/180/04.html>

3.2 Tahové vlastnosti polymerů

Mezi nejzákladnější mechanické charakteristiky materiálů patří tahové charakteristiky. Pokud je zkušební vzorek vystaven jednoosému namáhání v tahu, je možné jeho průběh deformace, popřípadě poměrného prodloužení v závislosti na normálovém napětí sledovat pomocí deformační křivky. Tato křivka poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu. Taková závislost je určována pomocí experimentu. Zkušební vzorek je uchycen do čelistí do zkušebního stroje a na zkušební vzorek je nasazen extenzometr. Během zkoušky je zaznamenávána závislost působící síly F , popřípadě napětí na poměrném prodloužení zkušebního vzorku nebo na jmenovitém poměrném prodloužení, které je určeno z pohybu příčnicku zkušebního stroje. Pro výpočet smluvního napětí platí následující rovnice:

$$\sigma_{SMLUVNÍ} = \frac{F}{S_0} \quad [MPa] \quad (1)$$

kde F je velikost působící síly,

S_0 je původní průřez zkušebního tělesa.

Pro výpočet poměrného (relativního) prodloužení platí následující vztah:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

kde ΔL_0 je zvětšení počáteční měřené délky,

L_0 je počáteční měřená délka zkušebního tělesa.

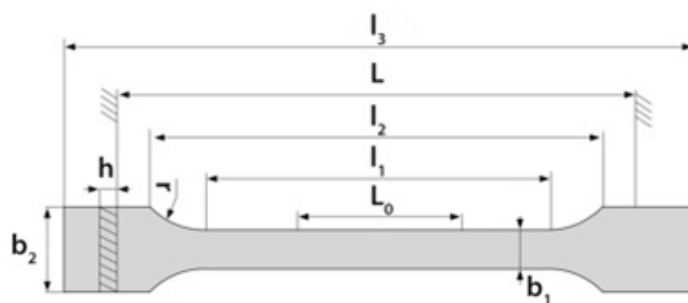
Pro výpočet jmenovitého poměrného prodloužení použijeme vztah:

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L_{up}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

kde L_t je zvětšení upínací vzdálenosti mezi čelistmi,

L_{up} je upínací vzdálenost mezi čelistmi.

Rozměry a tvar zkušebního vzorku jsou definovány normou pro konkrétní materiál. Ve většině případů se však využívají zkušební vzorky ve tvaru takzvaných osmiček, které umožňují pevné uchycení vzorku v čelistech. Napětí je přitom koncentrováno do zúžené části zkušebního vzorku.



Obrázek 6 Možný tvar zkušební vzorku

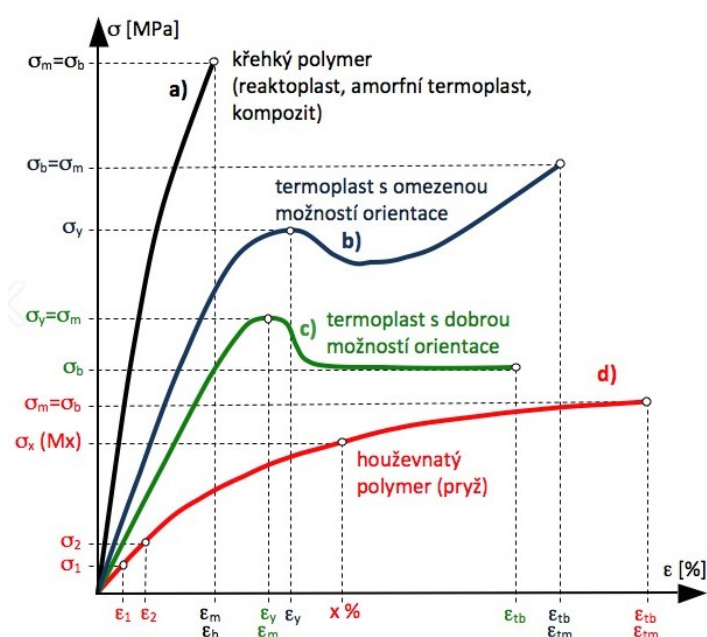
Z deformační křivky se určují pevnostní charakteristiky, jako napětí na mezi kluzu, mez pevnosti a napětí při přetržení zkušební vzorku. V textu je použito značení jednotlivých charakteristik, které je dáno mezinárodním předpisem pro plasty. Elastomery používají jiná značení, ale význam těchto charakteristik je naprosto shodný.

Mez pevnosti R_m

Je to maximální napětí v tahu. Jeho velikost odpovídá maximální síle, která byla naměřená během tahové zkoušky. Jeho hodnota je stanovena následujícím vztahem.

$$R_m = \frac{F_{MAX}}{S_0} \quad [MPa] \quad (4)$$

U elastomerů se jedná o rozmezí od 4 MPa do 30 MPa.



Obrázek 7 Deformační křivky polymerů v tahu

Zdroj: <https://publi.cz/books/180/09.html>

Napětí na mezi kluzu σ_Y

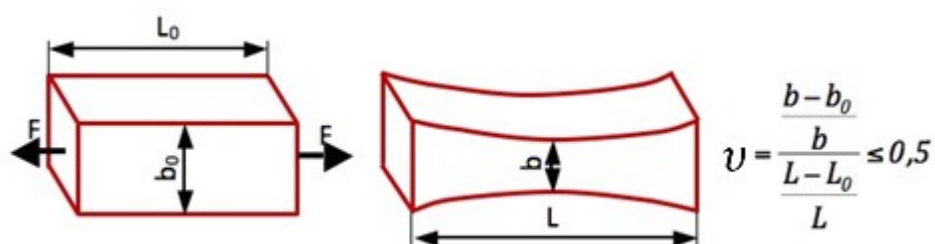
Je to maximální napětí, během kterého začíná docházet k plastické (trvalé) deformaci. Začíná se tvořit krček, který se s rostoucím napětím rozšiřuje. Napětí na mezi kluzu je považováno za horní hranici přípustného napětí při provozu součásti, protože po překročení této hranice vznikají trvalé deformace.

Napětí při přetržení σ_b

Napětí, při kterém dojde k porušení zkušebního tělesa. Pro pryž je tento bod zobrazen na obrázku 7 (červená křivka s označením d).

Mezi další velmi důležitou charakteristiku materiálů patří modul pružnosti, který vyjadřuje jeho tuhost. S rostoucí hodnotou modulu pružnosti stoupá i jeho tuhost. U elastomerů se stanovuje modul pružnosti velmi obtížně, jelikož se chovají již od počátku nelineárně. Například u pryží nebo u termoplastických materiálů se postupuje následovně. Zkoušený vzorek se protáhne na smluvní hodnotu, například o 100% nebo o 300% a odečte se smluvní napětí. Toto napětí se běžně označuje jako modul protažení (gumárenský modul): M100, M300, charakterizující tuhost elastomeru v počátečních fázích deformace. Tento modul má však jiný význam než modul pružnosti, který se stanovuje u plastů.

Mezi další mechanické charakteristiky, které lze z deformačních křivek stanovit patří tzv. Poissonův poměr ν , který vyjadřuje poměr mezi příčným zúžením a podélným protažením při deformaci polymeru. Pro nestlačitelné materiály, jako je například korek, je roven Poissonův poměr hodnotě 0,5. Jelikož jsou kaučuky téměř nestlačitelné, tak se jejich Poissonův poměr pohybuje v rozmezí hodnot 0,48 až 0,5. U plastů je však hodnota daleko nižší a pohybuje se v rozmezí hodnot 0,3 až 0,45.



Obrázek 8 Poissonův poměr

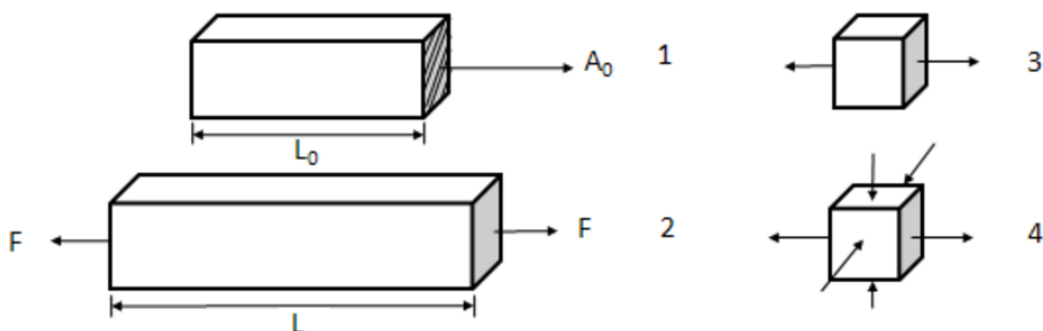
Zdroj: <https://publi.cz/books/180/09.html>

3.3 Experimenty pro získání vstupních materiálových dat pro MKP

Analýzy elastomerů v metodě konečných prvků často vyžadují použití hyperelastických materiálů. Většina hyperelastických materiálů funguje lépe, pokud jsou popsány jejich vlastnosti ve všech třech směrech. Materiálové parametry by měly být charakterizovány při teplotě použití. Špatný materiálový model bude s největší pravděpodobností vykazovat chybné výsledky, aniž bychom si toho všimli. Minimem, pro získání materiálových parametrů, je získání dat z jednoosé tahové zkoušky. V tomto případě se doporučuje použít Neo-Hookevský materiálový model. Nejlepších výsledků je dosaženo, když jsou využity data z jednoosé tahové zkoušky, dvouosé tahové zkoušky a ze zkoušky, kdy je vzorek namáhán smykem.

3.3.1 Jednoosá tahová zkouška

Experimenty prostého tahu jsou velmi využívány pro elastomery. Existuje několik standardů pro testování v jednoosém tahu. Nicméně, experimentální podmínky pro analýzu jsou poněkud odlišné, než většina standardizovaných zkušebních metod. Nejvýznamnějším požadavkem je to, aby se dosáhlo stavu čisté tahové deformace. To znamená, že vzorek musí být mnohem delší ve směru protažení, než je jeho šířka a tloušťka. Cílem je vytvořit experiment, kde není žádné boční omezení pro ztenčování vzorku. Je také možné provést analýzu metodou konečných prvků na geometrii vzorku k určení délky vzorku vzhledem k šířkám. Vzhledem k tomu, že vzorek není určen k tomu, aby byl přetržen, není potřeba používat vzorek ve tvaru „psí kosti“. Také zde není žádný požadavek na absolutní velikost vzorku. Délka se v tomto případě týká délky vzorku mezi svorkami nástroje. Svorky vytvoří neurčitou napjatost a deformaci v oblasti okolo svorky v procesu upínání. Z tohoto důvodu musí být deformace měřena na vzorku, ale daleko od svorky. Je tedy vyžadováno bezkontaktní měřící zařízení, jako je video extenzometru nebo laserový extenzometr.

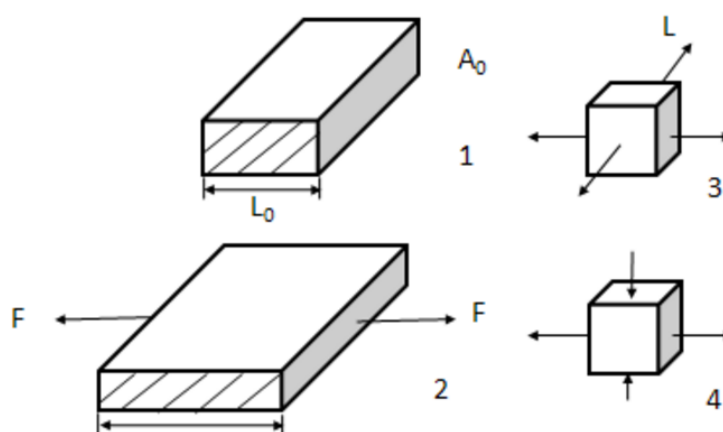


Obrázek 9 1 – počáteční konfigurace, 2 – zatížená konfigurace, 3 – napětí, 4 – deformace

Zdroj: https://help.ptc.com/creo_hc/creo30_pma_hc/korean/simulate/simulate/images/uniaxial-test

3.3.2 Prostý smyk

Experiment prostého smyku používaný pro analýzu není to, co by většina z nás očekávala. Experiment se na první pohled jeví jako nic víc, než velmi široká zkouška tahem. Vzhledem k tomu, že materiál je téměř nestlačitelný, stav čistého smyku existuje ve vzorku v úhlu 45° ke směru natahování. Nejvíce významným aspektem tohoto vzorku je to, že je mnohem kratší ve směru protažení, než je jeho šířka. Cílem je vytvořit experiment, kde je vzorek naprosto omezený v příčném směru tak, že všechny ztenčování se vyskytují ve směru tloušťky vzorku. Analýza metodou konečných prvků geometrie vzorku ukazuje, že vzorek musí být nejméně 10 krát větší než je délka ve směru natahování. Tento experiment je velmi citlivý na tomto poměru. Bezkontaktní měření deformace musí být opět dále od upínací svorky.



Obrázek 10 1 – počáteční konfigurace, 2 – zatížená konfigurace, 3 – napětí, 4 – deformace

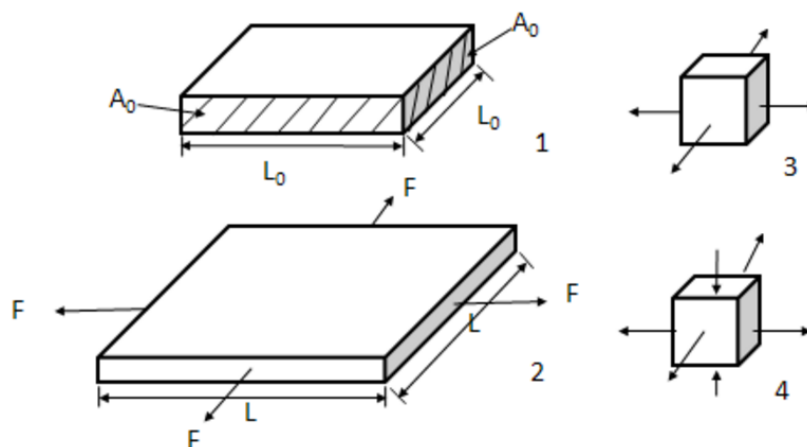
Zdroj: https://help.ptc.com/creo_hc/creo30_pma_hc/korean/simulate/simulate/images/planar-test

3.3.3 Tahová zkouška ve dvou osách

I když jednoosá tahová zkouška je pro jednoduchost, provedení a snadné určení deformace vzorku výhodná, nemusí být vhodnou metodou pro posouzení anizotropních vlastností materiálu. Biaxiální tahová zkouška dokáže na jediném vzorku porovnat vlastnosti jak v obvodovém, tak i axiálním směru. Oproti tomu u jednosé zkoušky je použito dvou vzorků a tedy není zajištěna jednotnost složení a rozměrových parametrů.

Dvouosá tahová zkouška vytváří deformaci vzorku současně ve dvou směrech. Mechanické zkušební stroje se dvěma nezávislými osami jsou velmi vzácné ve zkušebních laboratořích. Cílem bylo vyvinout takový zkušební přípravek, který umožní, aby bylo dosaženo rovnoměrného rozložení napětí ve dvou směrech při použití jednoosého

zkušebního stroje. Zkušební přípravek je tvořen z otočných nůžkových ramen a to tak, že přenáší pohyb křížové hlavy do zkušební vzorku pod úhlem $\pm 45^\circ$ vzhledem k ose zkušebního stroje. Deformace je měřena (pomocí videa extenzometrů) pomocí prodloužení dvou značek v ose zkušebního stroje.

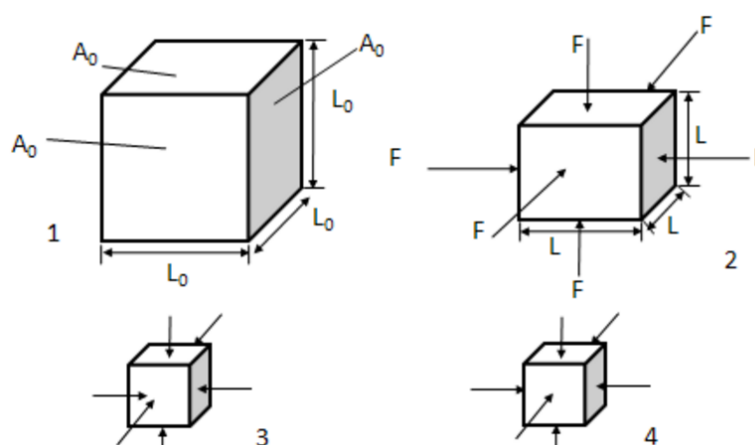


Obrázek 11 1 – počáteční konfigurace, 2 – zatížená konfigurace, 3 – napětí, 4 – deformace

Zdroj: https://help.ptc.com/creo_hc/creo30_pma_hc/korean/simulate/simulate/images/biaxial-test

3.3.4 Volumetrický test (objemová komprese)

Objemová komprese je experiment, kterým se zkoumá stlačitelnost materiálu. Může být proveden tak, že vzorek bude zatížen hydrostatickým tlakem, nebo je válcový vzorek omezen v přípravku a lisuje se. Skutečný posuv během komprese je velice malý, a proto je nutné brát v potaz také tuhost samotného přístroje.



Obrázek 12 1 – počáteční konfigurace, 2 – zatížená konfigurace, 3 – napětí, 4 – deformace

https://help.ptc.com/creo_hc/creo30_pma_hc/korean/simulate/simulate/images/volumetric-tests

3.4 Hyperelastické materiálové modely v softwaru ANSYS Workbench

Pro popis chování materiálů jako jsou pryže, pěny, plasty a biomateriály jsou vhodné nelineární elastické materiálové modely (hyperelastické). U těchto materiálů můžeme pozorovat to, že jsou schopny velmi velkých vratných deformací. Také je nutno poznamenat, že vztah mezi napětím a deformací je silně nelineární. Nejčastějším materiálem, který má následující vlastnosti je pryž.

Vlastnosti hyperelastických materiálů:

- Velké deformace až 700 %,
- Silně nelineární vztah mezi napětím a deformací,
- Tlumicí vlastnosti jsou velmi specifické,
- Teplotně a časově závislé chování,
- Nestlačitelnost (to znamená, že se objem významně nemění se vzrůstajícím napětím).

Pro popis hyperelastických materiálových modelů se vychází z funkce hustoty deformační energie (strain energy density function) W . Když tuto funkci derivujeme dle deformací, získáme napětí. Z větší části se při definici této funkce využívají deformační invarianty. Tyto invarianty se definují na základě třech protažení (stretch ratios) λ .

Deformační invarianty jsou definovány následujícími vztahy:

$$\begin{aligned}I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\I_2 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2 \\I_3 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2\end{aligned}\tag{4}$$

Protažení λ jsou definovány následujícím vztahem:

$$\lambda_i = \frac{L_i}{L_{0i}}\tag{5}$$

kde L je deformovaná délka vzorku,

L_0 je počáteční délka vzorku.

Za předpokladu, že je materiál úplně nestlačitelný, platí, že $I_3 = 0$.

Hyperelastické materiály se chovají velmi odlišně a komplikovaně, ve srovnání s kovovými materiály. Hyperelastické materiály se chovají rozdílně při různých typech namáhání, jako je tah, tlak a smyk. Pro získání materiálových konstant hyperelastických materiálů je potřeba mít dostupné data z více materiálových testů. Většinou se jedná o následující materiálové testy: jednoosý tah, smyk, dvojosá napjatost (tahová).

3.4.1 Neo-Hookeovský materiálový model

Nejjednodušším modelem pro hyperelastický materiál je Neo-Hookeovský model. Funkce hustoty deformační energie W je definována následujícím vztahem:

$$W = \frac{\mu}{2} \cdot (I_1 - 3) + \frac{1}{d} \cdot (J - 1)^2 \quad (6)$$

- kde I_1 je první deformační invariant,
 μ je počáteční smykový modul,
 d je parametr materiálové nestlačitelnosti,
 J je poměr mezi deformovaným a původním objemem,
 K je počáteční objemový modul.

Vztah mezi počátečním objemovým modulem a parametrem materiálové nestlačitelnosti

$$K = \frac{2}{d} \quad (7)$$

Za předpokladu, že se jedná o nestlačitelný materiál, pak $J = 1$ a můžeme funkci hustoty deformační energie W zjednodušit na následující tvar:

$$W = \frac{\mu}{2} \cdot (I_1 - 3) \quad (8)$$

U tohoto modelu získáme dobré výsledky s experimentem do 40% deformace v tahu a do 90% deformace v čistém smyku. Za předpokladu vyšších deformací je již tento model nepoužitelný a je nutno použít jiné hyperelastické modely.

Vstupní data v prostředí ANSYS Workbench jsou následující:

- počáteční smykový modul μ ,
- parametr materiálové nestlačitelnosti d .

3.4.2 Mooney-Rivlingův materiálový model

Mooney-Rivlingův model je rozšířením Neo-Hookeovského modelu. Existuje více forem tohoto modelu. Jednotlivé modely se liší počtem použitých parametrů. Vhodnou volbou počtu parametrů je možné dobře proložit data získaná z experimentu a tím co nejlépe popsat chování materiálového modelu. V praxi se začíná tak, že se využije model využívající dva parametry a postupně se zvyšuje počet parametrů, dokud nedosáhneme požadovaného chování materiálu. Základní funkce hustoty deformační energie W Mooney-Rivlingova modelu je definována následujícím vztahem:

$$W = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{01} \cdot (I_2 - 3) + \frac{1}{d} \cdot (J - 1)^2 \quad (9)$$

kde I_2 je druhý deformační invariant,

C_{ij} jsou materiálové konstanty charakterizující deviátorovou deformaci.

Počáteční smykový modul je popsán následujícím vztahem

$$\mu = 2 \cdot (C_{10} + C_{01}) \quad (10)$$

Pro počáteční objemový modul platí totožný vztah, jako u Neo-Hookeovského modelu.

Parametr materiálové nestlačitelnosti získáme z následujícího vztahu:

$$d = (1 - 2 \cdot \nu) / (C_{10} + C_{01}) \quad (11)$$

kde ν je Poissonovo číslo.

Tento hyperelastický model vykazuje velmi dobré výsledky do 100% deformace při tahovém zatížení a do 30% deformace při zatížení tlakovém.

Vstupní data v prostředí ANSYS Workbench jsou následující:

- Materiálová konstanta C_{10} ,
- Materiálová konstanta C_{01} ,
- Parametr materiálové nestlačitelnosti d .

3.4.3 Yeohův materiálový model

Tento materiálový model se liší od předchozích polynomiálních modelů, jelikož je závislý pouze na prvním deformačním invariantu I_1 . Proto můžeme získat materiálové konstanty pouze z jednoosé tahové zkoušky. Díky tomu je možné redukovat náklady na ostatní materiálové testy. Tento materiálový model však nevykazuje dobré materiálové výsledky při malých deformacích. Tento materiálový model se může vyskytovat v několika variantách. Základní funkce hustoty deformační energie W pro Yeohův materiálový model je definována následujícím vztahem:

$$W = \sum_{i=1}^M C_{i0} \cdot (I_1 - 3) + \sum_{k=1}^M \frac{1}{d_k} \cdot (J - 1)^{2k} \quad (12)$$

kde C_{i0} je materiálová konstanta,

d_k je materiálová konstanta.

Obecně neexistuje žádné omezení pro hodnotu M . Zvolením vyšší hodnoty M získáme přesnější řešení. Může však dojít k numerickým problémům při volbě nevhodných materiálových konstant. Z těchto důvodů se nedoporučuje velmi vysoká hodnota M . [7]

Pro počáteční smykový modul platí následující vztah

$$\mu = 2 \cdot C_{10} \quad (13)$$

Počáteční objemový modul je definován stejně jako u Neo-Hookeovského modelu.

Pro $M = 1$ je Yeohův materiálový model stejný s Neo-Hookeovským materiálovým modelem.

Vstupní data v prostředí ANSYS Workbench jsou následující:

- Materiálové konstanty C_{i0} ,
- Materiálová konstanta d_k .

3.4.4 Ogdenův materiálový model

Ogdenův materiálový model má velmi dobrou shodu s daty, která byla získána experimentálně v oblasti velkých deformací. Materiálový model vykazuje velmi dobré výsledky do 700% deformace. Základní funkce hustoty deformační energie W pro Ogdenův materiálový model je definována následujícím vztahem:

$$W = \sum_{i=1}^M \frac{\mu_i}{\alpha_i} \cdot (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{k=1}^M \frac{1}{d_k} \cdot (J - 1)^{2k} \quad (14)$$

kde λ_p jsou hlavní protažení,

μ_i, α_i, d_k jsou materiálové konstanty.

Obecně neexistuje žádné omezení pro hodnotu M . Vyšší hodnota M může vykazovat lepší výsledky v porovnání se skutečným řešením. Může však dojít k numerickým problémům při volbě nevhodných materiálových konstant. Z těchto důvodů se nedoporučuje velmi vysoká hodnota M . [7]

Počáteční smykový modul je definován následujícím vzorcem:

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot \mu_i \quad (15)$$

Počáteční objemový modul je definován stejně jako u Neo-Hookeovského modelu.

Pro $M = 1$ a $\alpha_1 = 2$ je Ogdenův materiálový model totožný s Neo-Hookeovským materiálovým modelem. Pro $M = 2$, $\alpha_1 = 2$ a $\alpha_2 = -2$ je Ogdenův materiálový model totožný s dvouparametrovým Mooney-Rivlingovým materiálovým modelem.

Parametrem α definujeme zpevňování či změkčování materiálu.

Vstupní data pro model prvního stupně v prostředí ANSYS Workbench jsou následující:

- Materiálová konstanta μ_i ,
- Materiálová konstanta A_1 ,
- Parametr materiálové nestlačitelnosti d .

4 IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ PRYŽE

Obsah této kapitoly je neveřejný a na přání firmy Mubea s.r.o. je zařazen do technické zprávy do neveřejné přílohy diplomové práce [21].

5 PRINCIP VÝPOČTU A VYHODNOCENÍ DLE PŘÍRUČKY FKM

FKM-Guideline je velmi dobře akceptovatelný a široce používaný ověřovací postup v německy mluvících zemích pro analytické posouzení strojních součástí. Vydavatelem je German Engineering Federation, z originálního názvu Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau Forschungskuratorium Maschinenbau (VDMA FKM). Tyto postupy jsou dále vyvíjeny v rámci různých výzkumných projektů. Pokrývají statickou pevnost a únavovou životnost součástí z oceli a litiny (do 500 °C) a hliníku (do 200 °C).

5.1 Základní odvětví, kterými se FKM zabývá

Explicitní a implicitní simulace pomocí MKP

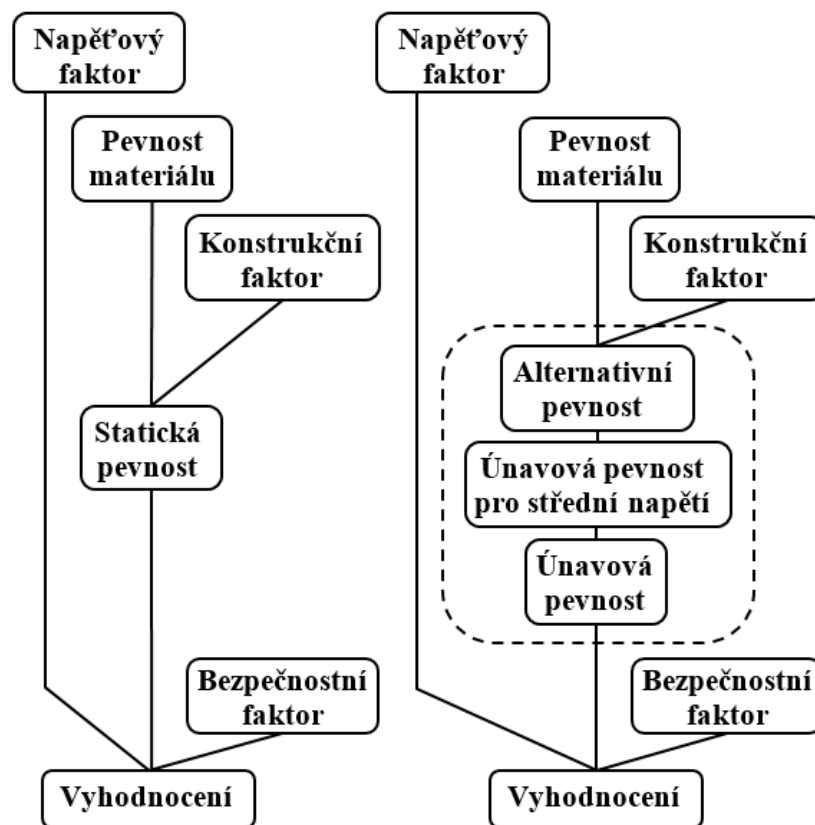
- Lineární a nelineární statické mechanismy.
- Dynamické výpočty.
- Optimalizace.
- Teplotní přenos a proudění.
- Životnost součástí.
- Nárazy.

Experimenty

- Zkouška životnosti.
- Měření zrychlení.
- Modální analýza.
- Teplotní a tenzometrická měření.

5.2 FKM Guideline v oblasti životnosti posuzuje následující parametry

- Statickou pevnost a limitní stavy.
- Mez únavy, únavovou pevnost a životnost..



Obrázek 13 Schéma vyhodnocení statického napětí (vlevo) a únavové životnosti (vpravo)

5.3 Výpočty jsou založeny:

- Na nominálním napětí v průřezu.
- Na lokálním napětí (efektivní napětí ve vrubu).

5.4 Použití výsledků z MKP analýzy

- Kritické body odpovídají maximální amplitudě napětí v daných místech a jsou vyčteny například za pomoci programu HyperView.

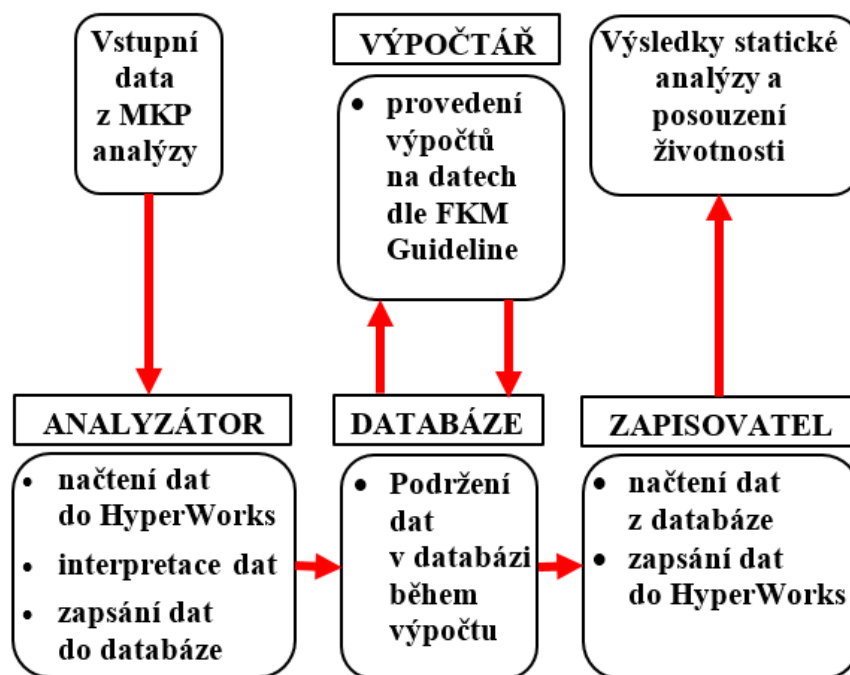
5.5 Potřebné vstupní hodnoty

- Způsob výpočtu (ke stanovení maximální amplitudy).
- Amplituda a střední hodnota elastických ekvivalentních napětí (dle hypotézy HMM) referenčního bodu na povrchu.
- Materiálové vlastnosti, povrchová úprava a průměrná drsnost povrchu.

5.6 Integrace do softwaru HyperWorks

- Potřebná napěťová data budou poskytnuty softwarem ANSYS Workbench.
- Napětí, data uzlů a elementů budou jsou exportovány z programu ANSYS Workbench do programu HyperView.
- Výsledky z Radioss, NASTRAN, ANSYS a Abaqus jsou podporovány.
- Výsledky statické a únavové můžou být vyhodnoceny pomocí 3D vizualizace v HyperView.

5.7 Struktura programu



Obrázek 14 Struktura výpočtu programu

5.8 Závěr

- Díky grafické vizualizaci je interpretace výsledků mnohem jednodušší.
- Používání HyperWorks a jeho vizualizace otevírá široké spektrum aplikací.

6 VÝPOČET NA BÁZI MKP A VYHODNOCENÍ DLE FKM

Obsah této kapitoly je neveřejný a na přání firmy Mubea s.r.o. je zařazen do technické zprávy do neveřejné přílohy diplomové práce [21].

7 VÝSLEDKY ŽIVOTNOSTI SVORKY ZÍSKÁNE EXPERIMENTEM

Obsah této kapitoly je neveřejný a na přání firmy Mubea s.r.o. je zařazen do technické zprávy do neveřejné přílohy diplomové práce [21].

8 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ

Obsah této kapitoly je neveřejný a na přání firmy Mubea s.r.o. je zařazen do technické zprávy do neveřejné přílohy diplomové práce [21].

9 ZÁVĚR

Obsah této kapitoly je neveřejný a na přání firmy Mubea s.r.o. je zařazen do technické zprávy do neveřejné přílohy diplomové práce [21].

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Podešvovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas. Dále bych rád poděkoval Ing. Lubošovi Pečenkovi z firmy Mubea za cenné rady a věnovaný čas. Také bych rád poděkoval doc. Ing. Radimovi Halamovi, Ph.D. za cenné rady a čas, který mi věnoval při provádění experimentů pryžového materiálu. Poděkování patří také mé rodině a přátelům za jejich podporu.

Zdroje

- [1] Domovská stránka repozitáře | Digitální knihovna VUT v Brně [online]. Copyright © [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/32455/MOTYKA_BP_2014.pdf
- [2] HÖSCHL, Cyril. Únava materiálu při periodickém zatěžování. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1981.
- [3] Home » Kapitola 5 - Zkoušení vlastností ocelí. Home [online]. Dostupné z: <http://ebook.veda-hrou.cz/cms/15-kapitola-5-zkouseni-vlastnosti-oceli.html>
- [4] MSC Software [online]. Copyright © 2011 MSC Software [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: <https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC10666&actp=LIST>
- [5] HÖSCHL, Cyril. Únava materiálu při periodickém zatěžování. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1981.
- [6] Luleå University of Technology [online]. Copyright © [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: <http://tu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1019156/FULLTEXT01.pdf>
- [7] ANSYS® Academic Research, Release 16.2, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- [8] Hyperelasticity. GitHub Pages [online]. Copyright © [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: <https://uiuc-cse.github.io/me498cm-fa15/lessons/abaqus/5.2-hyperelasticity.html>
- [9] Zkušební stroje LaborTech, charpyho kladivo, trhací stroje. Zkušební stroje LaborTech, charpyho kladivo, trhací stroje [online]. Copyright © 2013 [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz>
- [10] Sobriety s.r.o.. Sobriety s.r.o. [online]. Copyright © 2011 [cit. 08.05.2017]. Dostupné z: http://www.sobriety.cz/t_optical_systems_en.htm#hardware
- [11] J. Javořík, O. Bílek: NUMERICAL ANALYSIS OF BUSHING OF CAR STABILIZER. International Journal of Mechanics [online]. 2014, [cit. 08.05.2017], Dostupné z: <http://www.naun.org/main/NAUN/mechanics/2014/a142003-056.pdf>
- [12] KUČERA, Josef. Stručný úvod do mechaniky lomu. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1993. ISBN 8070782188.

- [13] MOHYLA, Miroslav. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1983.
- [14] KLESNIL, Mirko a Petr LUKÁŠ. Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání. Praha: Academia, 1975.
- [15] E. Haibach: FKM-Guideline ANALYTICAL STRENGTH ASSESSMENT OF COMPONENTS IN MECHANICAL ENGINEERING (Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM): 2003)
- [16] S. Koechlin: FKM GUIDELINE: STRENGTHS, LIMITATIONS AND EXPERIMENTAL VALIDATION. International Conference Proceedings, Fatigue Design 2015. 6th Edition
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815045932>
- [17] Výukové materiály | Matematika pro inženýry 21. století [online]. Copyright © [cit. 08.05.2017]. Dostupné z:
http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicních_prvku.pdf
- [18] Únavová pevnost a pevnost a životnost [online]. Copyright © [cit. 08.05.2017].
Dostupné z: <http://oprz.lss.fd.cvut.cz/dokumenty/070309UnavovaPevnostAZivotnost.pdf>
- [19] The School of Engineering and Engineering Technology [online]. Copyright ©M [cit. 08.05.2017].
Dostupné z: <http://engr.bd.psu.edu/ansysug/2007-11-20/WBEFatigue.pdf>
- [20] Mubea - Výrobky & technologie - Automotive - Podvozek. [online]. Dostupné z:
<https://www.mubea.com/cz/products-technologies/automotive/podvozek/>
- [21] HOLUB, R. *Analýza stabilizační svorky – srovnání výsledků MKP s experimenty., Technická zpráva.* OSTRAVA: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2017, 43 s.

PŘÍLOHY NA CD NOSIČI

- text diplomové práce